

青藏高原北缘早古生代 板块构造演化和大陆深俯冲

宋述光¹, 张立飞¹, Y. Niu², 宋 彪³, 刘墩一³

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. Department of Geoscience, University of Houston, Houston; 3. 北京离子探针中心, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 青藏高原北缘北祁连山和柴达木盆地北缘分别发育有2类不同的高压和超高压变质带。北祁连山为典型的环太平洋型俯冲带, 榴辉岩锆石的SHRIMP年龄为 $464 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$ 。而柴北缘为典型的大陆俯冲型变质带, 片麻岩锆石中的柯石英证明柴北缘是一超高压变质带。石榴橄榄岩中的超硅石榴子石和橄榄岩中的钛铁矿等出溶反映其形成深度大于200 km。柴北缘榴辉岩的原岩具有MORB和OIB的特征, 并与北祁连山榴辉岩的年龄相同, 代表早古生代祁连山俯冲变质的时代。而含柯石英片麻岩的锆石和石榴橄榄岩超高压变质年龄均为423 Ma, 代表大陆地壳深俯冲发生的时间。北祁连山和柴北缘很可能是一个俯冲带从大洋俯冲到大陆碰撞的不同阶段的产物。

关键词: 高压超高压变质带; 榴辉岩; 石榴橄榄岩; 含柯石英片麻岩; 北祁连山; 柴达木盆地北缘

中图分类号: P534.4; P542⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-2552(2004)09~10-0918-08

高压超高压变质带是古板块汇聚边界及大陆碰撞造山的重要标志, 它记录了地壳物质从俯冲到构造折返一个完整的动力学路径, 提供了了解大洋和大陆岩石圈物质俯冲和折返动力学过程的样板。自从在典型的大陆地壳岩石中发现微粒柯石英和金刚石包裹体^[1~4]以来, 人们对大陆板片向地幔俯冲的动力学过程的理解和认识发生了革命性的变化, 认识到大陆地壳的物质不仅能够俯冲到大于200 km的地幔深度^[5,6], 而且能够以与俯冲相同的速度快速折返回地壳^[7]。根据Maruyama等^[8]和Ernst^[9]的分类, 大陆上的俯冲带可以划分为环太平洋型(Pacific-type或B-type)和阿尔卑斯型(Alpine-type或A-type)。一个基本的事实是: 在大洋岩石圈俯冲消亡之后, 2个大陆岩石圈发生俯冲碰撞, 其中一个大陆岩石圈在俯冲的大洋岩石圈拖曳力的作用下俯冲到另一大陆岩石圈之下, 当大洋岩石圈与大陆岩石圈脱离(Breakoff)后, 大陆地壳物质由于浮力而折返回地表, 新生代以来的喜马拉雅和阿尔卑斯造山带就是很好的例证。

祁连山是中国著名的早古生代板块缝合带。早在20世纪70年代, 李春昱先生和他的合作者对北祁连山进行了研究, 确定该地区是中国境内最典型的板块俯冲带之一^[10,11], 为推动中国板块构造理论研究做出了不可磨灭的贡献。其南部的

柴达木盆地北缘是近年来识别的一条长约400 km的阿尔卑斯型超高压变质带^[12~18]。这2种类型的高压超高压变质带沿NW方向平行展布, 二者的相互关系并不清楚。Yang等^[19]认为这2条高压变质带是互不关联的2条古俯冲带变质的产物。通过对2条带内各类岩石的岩石学、地球化学、同位素年代学等方面的研究, 结合区内前寒武纪基底和相关沉积盖层的分析, 作者对这2条带的相互关系及其青藏高原北缘早古生代大洋俯冲到大陆碰撞的动力学过程进行了深入探讨, 其结果对于了解本地区乃至全球构造演化模式都具有重要意义。

1 青藏高原北缘的构造单元

祁连山-北柴达木山系位于青藏高原的北部, 在大地构造上是阿拉善地块与柴达木地块之间的巨型复合造山带。青藏高原北缘由北向南可以划分为5个构造单元(图1): ①阿拉善地块; ②北祁连山环太平洋型俯冲带(缝合带); ③祁连山地块; ④柴北缘超高压变质带; ⑤柴达木地块。这些构造单元在西部被NE向的阿尔金山左行走滑断裂所切, 而2条高压超高压变质带可以追索到走滑断裂的西部^[20]。

阿拉善地块是中朝克拉通的一部分, 主要由早前寒武纪基底和早古生代台型沉积盖层组成。其西部为敦煌地块, 具

收稿日期: 2004-06-14

基金项目: 国家重点发展规划项目(G1999075508)和国家自然科学基金项目(40228003, 40272031, 40372031, 40325005)资助。

作者简介: 宋述光(1963-), 男, 博士, 副教授, 从事高压超高压变质岩和板块动力学等方面的研究。E-mail: sgsong@pku.edu.cn

有3600 Ma的古老结晶基底^[21]。

北祁连山缝合带是一典型的环太平洋型俯冲带,呈NW向展布于其北侧的阿拉善地块与南侧的祁连地块之间。带内由早古生代蛇绿岩组合、岛弧杂岩及俯冲杂岩(包括蛇绿混杂岩和低温高压蓝片岩、榴辉岩)组成,岩石组合特征反映北祁连山是一典型的环太平洋型或B型俯冲带,是2个大陆之间的缝合线。志留系以残余海相复理石建造为特征,泥盆系为磨拉石,石炭系—三叠系为稳定盖层沉积^[22,23]。

祁连地块的前寒武纪基底岩石主要有长英质片麻岩、大理岩、斜长角闪岩和麻粒岩,其南部发育有厚层的早古生代沉积岩系(图1)。Wan等^[24]报道不同部位花岗质片麻岩的单颗粒锆石年龄为910~940 Ma。

柴北缘超高压变质带详细的岩石学、矿物学、地球化学等特征可参见参考文献[17,18]。花岗质片麻岩锆石SHRIMP年龄为1003 Ma±14 Ma,与Wan等^[24]报道的祁连地块花岗质片麻岩的年龄一致。

柴达木地块是一中生代沉积盆地。张建新等^[25]报道地块南部变质片麻岩的继承碎屑锆石SHRIMP年龄主要集中在1600~1800 Ma范围内,并认为柴达木地块与扬子克拉通有明显的亲缘性。

2 北祁连山板块缝合带高压变质岩的岩石学特征和形成时代

Wu^[26]和宋述光^[27]将北祁连山高压变质岩划分为高级蓝片岩带和低级蓝片岩带。高级蓝片岩带呈3个构造岩片分布于祁连山东西两侧岛弧火山杂岩之中(图2),高级蓝片岩带的长度约100 km,主要为各种不同原岩变质的蓝片岩和榴辉

岩组成。低级蓝片岩带出露于甘肃肃南县境内的九个泉一带,主要为火山岩和少量沉积岩变质的绿帘石—硬柱石—蓝闪石片岩,变质温度 $T \leq 350^{\circ}\text{C}$ ^[23,26,28]。

2.1 蓝片岩

蓝片岩的岩石类型和变质矿物组合随原岩的不同呈现较大的变化。蓝片岩的原岩主要包括硬砂岩、大理岩以及蛇绿岩组合中的超基性岩、堆晶辉长岩、基性熔岩和含锰硅质岩等。不同原岩的主要变质矿物组合为石榴子石+蓝闪石+多硅白云母+绿帘石±硬绿泥石±金红石(变硬砂岩和泥质岩)、石榴子石+蓝闪石+绿帘石+绿泥石+钠长石+石英(变基性火山岩)、硬绿泥石+多硅白云母+石英(变泥硅质岩)、锰铝榴石+蔷薇辉石+石英(含锰硅质岩)。根据矿物共生组合估计,绿帘石蓝片岩的形成温度 $T > 350^{\circ}\text{C}$, $p \geq 0.7\text{GPa}$ 。

2.2 榴辉岩

榴辉岩主要呈大小不等的岩块分布于蓝片岩中,大部分榴辉岩呈粒状变晶结构,石榴子石和绿辉石等显弱定向,但有的榴辉岩片状结构十分发育。榴辉岩的共生矿物组合主要为石榴子石+绿辉石+多硅白云母+金红石;片状榴辉岩中含有较多的帘闪石(可达15%)。大部分样品都有不同程度的蓝片岩相和绿片岩相退化变质改造。电子探针分析结果表明,石榴子石以铁铝榴石为主(Alm53.5 mol%~65.5 mol%),钙铝榴石次之(Grs25.1 mol%~34.4 mol%),镁铝榴石较低(Pyrr5.4 mol%~16.2 mol%),锰铝榴石含量0.5 mol%~1.6 mol%。绿辉石硬玉分子为28.1 mol%~49.8 mol%,霓石含量可达24.4 mol%。多硅白云母的Si含量为3.37~3.47 p.f.u.。利用Krogh-Ravna^[29]的Grt-Omp-Phn温压计获得榴辉岩变质的温压条件为 $p = 1.8\sim 2.5\text{GPa}$, $T = 480\sim 550^{\circ}\text{C}$ 。

根据TiO₂含量可以将北祁连山榴辉岩划分为2种类型:

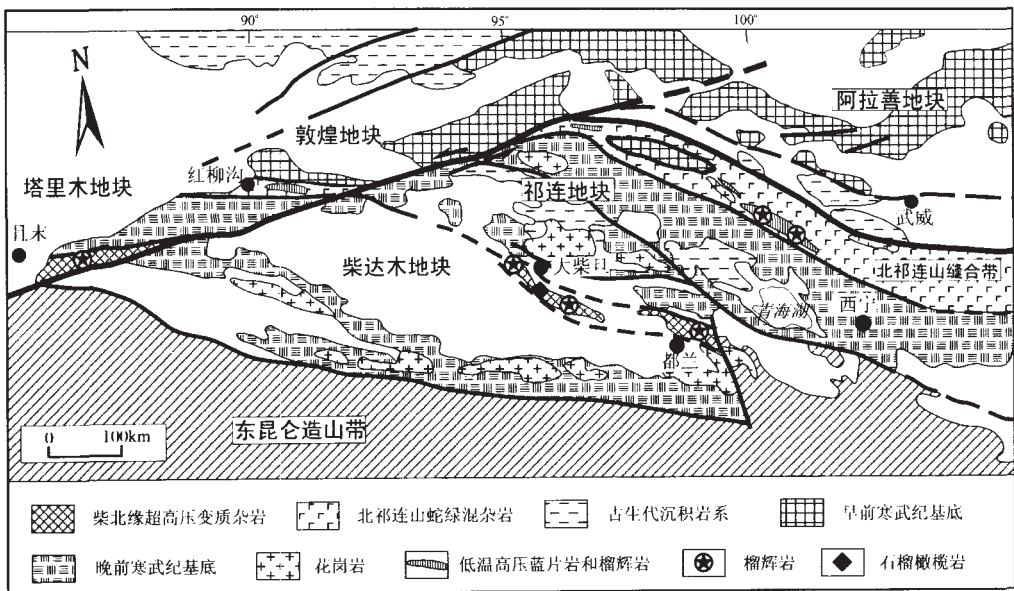


图1 青藏高原北缘柴达木—祁连山一带大地构造图

Fig.1 Tectonic map of the Qaidam-Qilian region on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

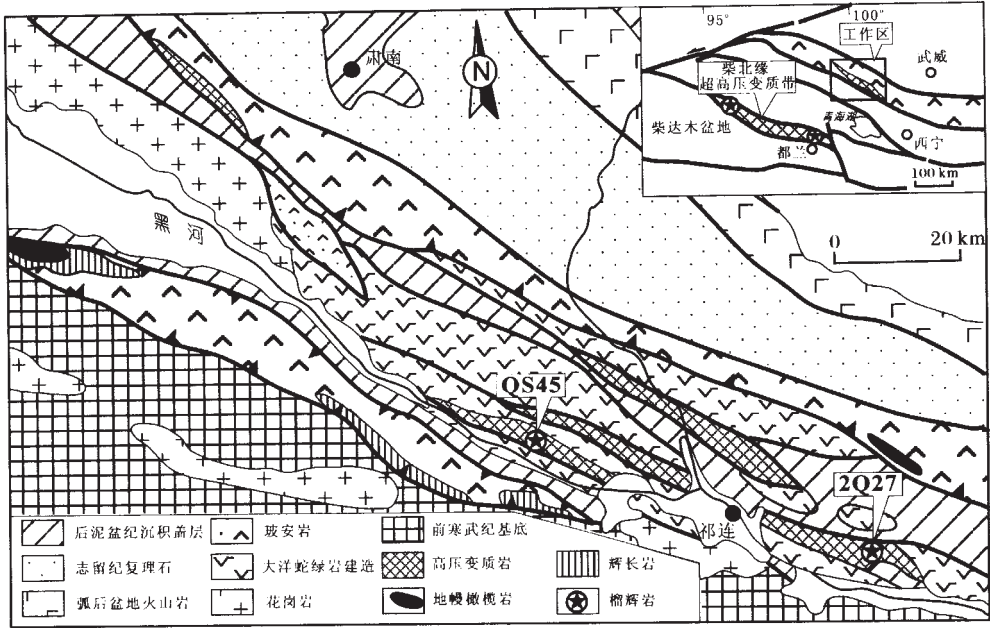


图2 北祁连山中段地质简图

Fig.2 Geological sketch map of the central segment of the North Qilian Mountain

大部分样品的TiO₂含量相对较低,为1.33%~1.74%,少数样品的TiO₂>2.0%。在TiO₂与FeO/MgO(图3-a)和Ti与V(图3-b)图解中,相对低Ti的样品主要分布于MORB区域,而高Ti样品主要分布于WPB区域。在Pearce等^[30]Ti-Zr-Y(图4-a)以及Meschede^[31]Nb-Zr-Y图解(图4-b)中,样品主要投于N-MORB区域中,少数高Ti样品投于WPB区域内,表明北祁连山榴辉岩的原岩主要是N-MORB型大洋玄武岩,少量为OIB型玄武岩,代表大洋地壳的成分。

宋述光等^[32]对2个榴辉岩样品进行了锆石的阴极发光(CL)和SHRIMP定年研究。锆石的阴极发光图像反映为典型的变质成因锆石,SHRIMP定年所获得的年龄值分别为463 Ma±6 Ma和468 Ma±13 Ma,是本区榴辉岩相变质的时代。这是北祁连山加里东期高压变质作用的最早记录,代表

了大洋板块俯冲进入上地幔经受榴辉岩相变质的时间。

3 柴北缘超高压带岩石学和大陆俯冲折返的过程

柴北缘超高压变质带位于柴达木地块和祁连地块之间(图1),自东到西为都兰含榴辉岩地体、锡铁山含榴辉岩地体、绿梁山含石榴橄榄岩地体和大柴旦榴辉岩地体。带内以花岗质片麻岩为主,占总体积的80%以上,榴辉岩和副片麻岩都呈大小不等的透镜状岩块分布于花岗质片麻岩之中。副片麻岩锆石中柯石英包裹体^[15,17]和石榴橄榄岩的石榴子石中辉石、钠质闪石出溶片晶^[6,33]的发现及其岩石组合等确证,柴北缘是典型的与大陆碰撞有关的阿尔卑斯型超高压变质带,可

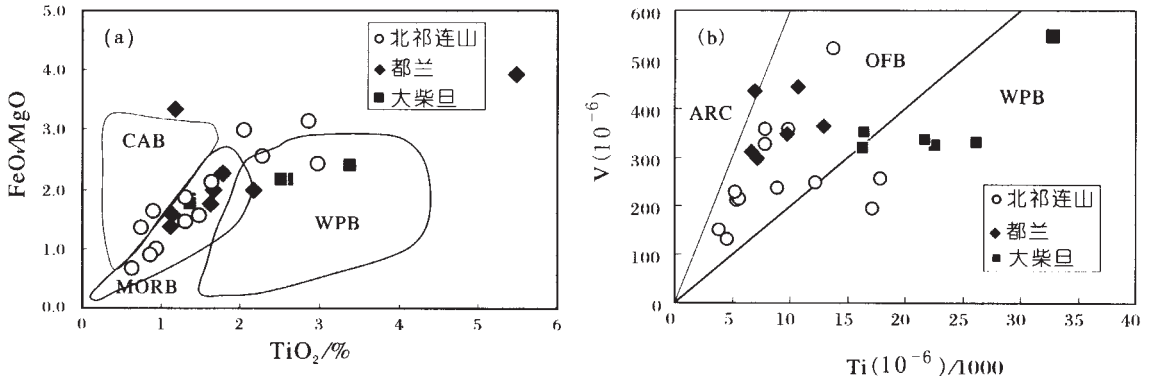


图3 北祁连山和柴北缘榴辉岩的TiO₂-FeO/MgO图解(a)和Ti-V图解(b)

Fig.3 TiO₂-FeO/MgO diagram (a) and Ti-V diagram (b) of eclogite in the North Qilian Mountain and on the northern margin of the Qaidam basin

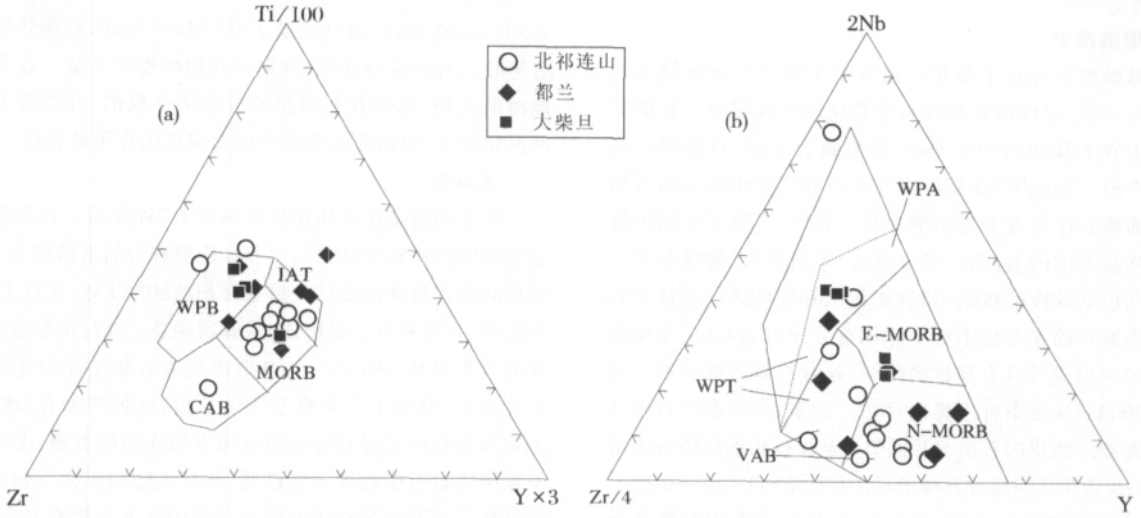


图4 北祁连山和柴北缘榴辉岩的Ti-Zr-Y图解(a)和Nb-Zr-Y图解(b)

Fig.4 Ti-Zr-Y diagram (a) and Nb-Zr-Y diagram (b) of eclogite in the North Qilian Mountain and on the northern margin of the Qaidam basin

WPB—板内玄武岩;IAT—岛弧拉斑玄武岩;MORB—洋中脊玄武岩;CAB—钙碱性玄武岩;WPA—板内碱性玄武岩;WPT—板内拉斑玄武岩;VAB—火山弧玄武岩;E-MORB—异常洋中脊玄武岩;N-MORB—正常洋中脊玄武岩

与世界上的经典地区,如中国的大别-苏鲁超高压带、挪威的WGR超高压带等相对比。

3.1 榴辉岩

Song等^[17,18]对都兰超高压地体榴辉岩的岩石学、矿物学、岩石地球化学、Sm-Nd年龄、变质温压条件和p-T-t轨迹等方面进行了详细研究。根据榴辉岩的岩石学、矿物学和地球化学等不同特征,Song等^[17,18]将都兰地体划分为南北2个亚带。北带榴辉岩的典型矿物组合为Grt+Omp+Phn+Rt,南带榴辉岩的典型矿物组合为Grt+Omp+Ky+Rt±Phn。石榴子石和绿辉石中的透长石+石英包裹体、柯石英假像以及绿辉石中的大量石英出溶片晶的发现表明都兰榴辉岩峰期变质条件位于柯石英的稳定域,与Grt-Omp-Phn温压计计算的温压条件(p=2.8~3.3 GPa,T=620~740℃)一致。

在都兰北带剖面(图5)中,榴辉岩呈宽约300m的岩块分布于片麻岩中,与其北侧出露的蛇纹岩岩块和含石榴子石辉石岩构成一套从地幔橄榄岩-堆晶岩-玄武岩较为完整的

蛇绿岩组合。地球化学分析表明,柴北缘榴辉岩的原岩包括LREE亏损的N-MORB、LREE富集的E-MORB和成分上类似海山的洋岛玄武岩(OIB)。在图3和图4中,柴北缘超高压带榴辉岩与北祁连山榴辉岩的地球化学特征基本一致,反映二者原岩都来自大洋地壳。

利用阴极发光和SHRIMP定年技术,作者对都兰超高压变质地体的榴辉岩样品2D155的锆石进行了详细研究^[34]。锆石的形态呈卵圆形,粒度为80~200 μm。阴极发光图像反映锆石是典型的变质成因,15颗锆石SHRIMP测试所获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄区间为440 Ma~482 Ma,其加权平均年龄为458 Ma±7 Ma(MSWD=0.97),与Song等^[18]报道的2个样品Sm-Nd全岩-矿物内部等时线年龄(458 Ma±10 Ma和459 Ma±2.6 Ma)相同。该年龄与北祁连山榴辉岩的形成年龄基本一致,说明二者具有相同的变质时代。另外,大部分锆石具有很窄的亮边,是后期退化变质期间生长或Pb丢失造成的,只有一颗锆石的亮边较宽,获得的SHRIMP²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为426 Ma±12 Ma,代

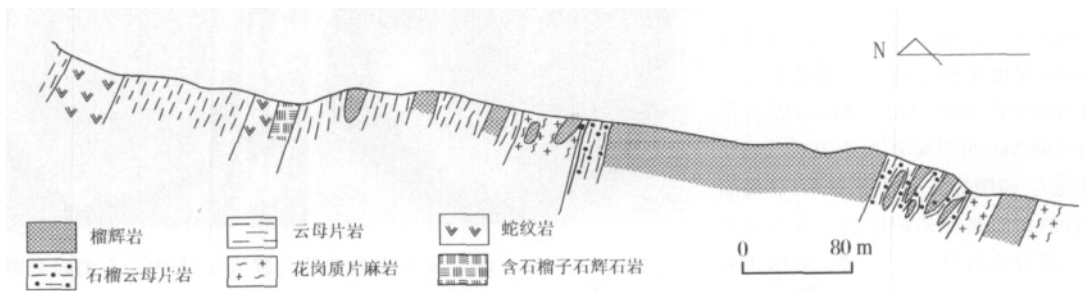


图5 都兰北带榴辉岩典型剖面^[18]

Fig.5 Typical section of eclogite in the north Dulan belt

表后期改造年龄。

3.2 石榴橄榄岩

石榴橄榄岩分布于柴北缘超高压变质带大柴旦镇以北的绿梁山一带,以构造岩块分布于花岗质片麻岩中。石榴二辉橄榄岩在岩体中占70%~80%,与纯橄岩互层,石榴辉石岩呈脉状产出。Song等^[6]首先报道了在石榴二辉橄榄岩的石榴子石和橄榄石中发现大量出溶片晶。其中,石榴子石的出溶片晶包括高密度的金红石、斜方辉石、单斜辉石,橄榄石中的出溶片晶包括钛铁矿和铝-铬铁矿棒状和针状体。石榴子石中辉石出溶片晶在石榴子石中体积百分比可达4.5%,说明石榴子石的原始成分具有超硅的特征,这种超硅石榴子石只可在超过200 km深度条件下稳定存在。后来,在石榴子石中又发现了大量的钠质闪石出溶片晶^[3]。金红石和钠质闪石出溶片晶进一步说明这些超硅石榴子石含有过量的Ti(0.6%~0.8%)、Na(约0.3%)和OH⁻(>1000×10⁻⁶),并且只有在很高的压力条件下才能稳定。根据超硅石榴子石Ti和Na的含量估算的形成压力应大于7 GPa。橄榄石中高密度的钛铁矿和铝-铬铁矿棒状出溶体说明橄榄石的原始成分含有过量的Ti、Cr、Al等不相容元素。根据钛铁矿含量计算Ti在橄榄石中可达0.53%~0.69%,从而估算橄榄石的形成压力 $p > 7$ GPa。另外,通过石榴二辉橄榄岩基质矿物的温压计算获得再平衡的温度 $T = 960 \sim 1040^\circ\text{C}$,压力 $p = 5.0 \sim 6.5$ GPa。根据以上观察和分析,作者认为柴北缘超高压变质带中的石榴橄榄岩应代表从深度大于200 km折返到大陆造山带的地幔物质。

Song等^[3]对柴北缘石榴橄榄岩各类岩石的锆石进行了详细的综合性研究,其中包括激光拉曼包裹体研究、阴极发光图像分析、锆石微量元素LA-ICP-MS分析以及离子探针(SHRIMP)的年代学研究。利用激光拉曼首次在锆石中发现与石榴子石共生的微粒金刚石和石墨包裹体。这是在柴北缘超高压带中首次发现金刚石包裹体,也是全球范围内超高压变质带石榴橄榄岩中发现的第2颗原位产出的金刚石。阴极发光和SHRIMP定年结果显示石榴二辉橄榄岩中锆石主要有4组年龄:①具岩浆结构的核部年龄为 $457 \text{ Ma} \pm 22 \text{ Ma}$,是与早期大洋俯冲有关的橄榄岩质(?)熔体结晶的产物;②锆石幔部的年龄为 $423 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$,是由在大陆碰撞过程中大于200 km深度条件下超高压变质作用形成的;③锆石边部年龄为 $397 \text{ Ma} \pm 6 \text{ Ma}$;④最外部的年龄为 $349 \sim 368 \text{ Ma}$,可以解释为造山期后热事件的叠加。形态学和阴极发光图像显示,纯橄岩和石榴辉石岩的锆石是变质成因的,其内部结构非常均匀,部分锆石具有与石榴二辉橄榄岩锆石核部年龄一致的残核。纯橄岩锆石的加权平均年龄为 $420 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$,与石榴二辉橄榄岩锆石的幔部变质年龄吻合,并与含柯石英的泥质

片麻岩锆石的年龄相当。石榴辉石岩锆石的加权平均年龄为 $397 \text{ Ma} \pm 8 \text{ Ma}$,而且记录了 $355 \text{ Ma} \pm 7 \text{ Ma}$ 的后期热事件改造年龄。所以资料证明,绿梁山石榴橄榄岩不是一古岩石圈地幔的残片,而是在板块俯冲过程中形成的,并经历了复杂的演化历史,包括大陆深俯冲过程和造山作用的折返。

3.3 片麻岩

柴北缘超高压变质带的片麻岩有2种类型:花岗质片麻岩和富铝质片麻岩(图5),二者都是榴辉岩的直接围岩。花岗质片麻岩占超高压变质带出露面积的80%以上,岩石主要由2种长石、石英和白云母组成,片麻状构造。锆石在形态上为极好的自形晶体(图6-a,b),其内部代表岩浆结晶的振荡环带十分发育,基本上不发育变质生长边,这种现象有2种可能:①花岗质片麻岩没有经过超高压变质作用的改造;②可能由于花岗质岩石中流体含量极低,并且大陆地壳向下俯冲的速度很快,岩石在超高压变质的过程中基本上没有发生变化。SHRIMP锆石定年获得的岩浆结晶年龄为 $1003 \text{ Ma} \pm 14 \text{ Ma}$,与陆松年等^[30]报道的本区花岗质片麻岩和Wan等^[24]报道的祁连地块中花岗质片麻岩的单颗粒锆石年龄一致。

富铝质片麻岩(副片麻岩)主要由石榴子石+白云母+黑云母+蓝晶石+石英+长石组成,片状或片麻状构造。其中的锆石大部分呈卵圆形,粒度为 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ (图6-c,d)。粒度较大的锆石多保留有残核,并具有石英、长石等超高压变质之前的矿物包裹体。在锆石的幔部,利用激光拉曼光谱仪发现

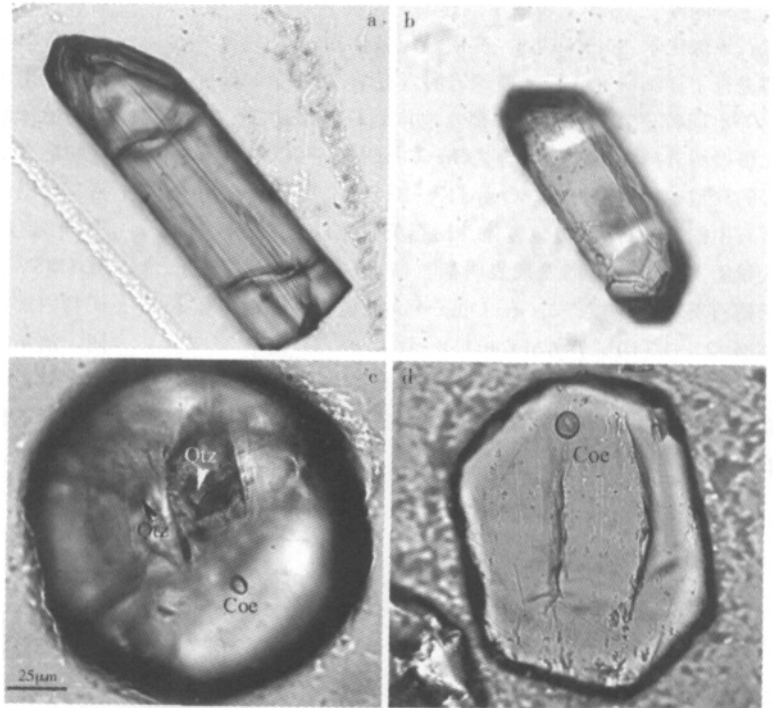


图6 花岗质片麻岩(a,b)和富铝质片麻岩(c,d)中锆石的显微照片

Fig.6 Photomicrographs of zircons from granitic gneiss (a,b) and peraluminous gneiss (c,d)

了典型的柯石英包裹体^[15,17],从而证明柴北缘是典型的超高压变质带,同时还发现有石榴子石、多硅白云母、金红石、蓝晶石等变质矿物。阴极发光图像显示,大部分锆石具有典型的核-幔-边结构,离子探针分析结果^[34]表明,核部的年龄非常分散,主要区间为900~1800 Ma,少数可达2200 Ma,反映沉积物源比较广泛,并且来自扬子型结晶基底。含柯石英等超高压变质矿物的幔部的年龄为423 Ma \pm 7 Ma,与上述石榴二辉橄榄岩和石榴纯橄岩中锆石的变质年龄相同,应代表大陆地壳物质深俯冲发生超高压变质的年龄,比榴辉岩的变质时代年轻约40 Ma。

4 讨论

4.1 北祁连山环太平洋型俯冲带的构造演化

北祁连山主要由蛇绿岩组合、岛弧杂岩和低温高压蓝片岩、榴辉岩组成,反映该地区曾经发生了大洋(古祁连山)俯冲消亡并最终闭合和造山的过程,是一典型的古板块缝合线。榴辉岩和蓝片岩的形成是大洋板块发生俯冲变质的产物,而大洋俯冲带的形成必须具有一定规模而使冷的、负浮力的岩石圈由于重力向地幔俯冲^[37~39]。这与本区大量产出N-型和E-型MORB特征的蛇绿岩^[40]的事实相一致。Wan等^[24]通过北祁连山南北两侧的阿拉善地块和中祁连地块的同位素年代学和地球化学研究认为,2个地块的前寒武纪基底具有明显的差异。Yang等^[19]报道了北祁连山玉石沟蛇绿岩中辉长岩的锆石SHRIMP年龄为533~568 Ma,表明本区大洋地壳的形成至少在晚前寒武纪到早寒武世,现有的古生物资料^[22,40]也证明本区大洋蛇绿岩的形成时代为中寒武世或更早。本文获得2个榴辉岩样品锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄值463~468 Ma,代表北祁连山古大洋俯冲到大于或等于60 km深度时发生榴辉岩相变质的时间。

蓝片岩中蓝闪石和多硅白云母的Ar-Ar年龄集中在440~460 Ma之间^[26,41~43],代表蓝片岩的冷却年龄并标志北祁连山高压变质作用的结束。结合北祁连山广泛发育的志留纪残余海盆相复理石建造和泥盆纪磨拉石,可以合理地推断古大洋的消亡和闭合时间为晚奥陶世末(约440 Ma),并在泥盆纪发生快速隆升的造山过程。

4.2 柴北缘超高压变质带的构造演化

柴北缘超高压带主要由正片麻岩、副片麻岩及少量榴辉岩、石榴橄榄岩透镜体组成。该岩石组合说明柴北缘超高压带是典型的阿尔卑斯型大陆碰撞带,并且可以与世界其他超高压变质带,如中国东部地区的大别-苏鲁超高压带、挪威West Gneiss Region超高压地体等相对比。

精确的SHRIMP锆石定年表明,大别-苏鲁超高压带榴辉岩的峰期变质年龄与泥质和花岗质片麻岩锆石的峰期超高压变质年龄一致^[44,45],而榴辉岩的原岩具有大陆地壳的性质或为层状侵入体,不能代表俯冲的大洋岩片^[46]。与之相反,柴北缘超高压变质带榴辉岩的地球化学特征显示其原岩具有MORB和OIB特征,代表俯冲大洋地壳的成分。锆石

SHRIMP年龄458 Ma \pm 7 Ma和Sm-Nd年龄458 Ma \pm 10 Ma、459 Ma \pm 2.6 Ma与北祁连山洋壳变质榴辉岩的SHRIMP年龄463~468 Ma一致。然而,含柯石英片麻岩锆石的SHRIMP年龄为423 Ma \pm 6 Ma,与石榴橄榄岩峰期变质年龄相同,该组年龄比榴辉岩年龄年轻约40 Ma,代表大陆地壳岩石俯冲到100~200 km的峰期超高压变质年龄。

4.3 北祁连山高压变质带与柴北缘超高压变质带的相互关系

根据上述2个高压超高压变质带的特征,作者认为,北祁连山低温高压变质带和柴北缘超高压变质带是一个板块俯冲带不同阶段的产物,即柴北缘超高压带是北祁连大洋俯冲消亡之后柴达木-祁连大陆向华北克拉通俯冲碰撞的结果。其关键性证据主要有以下几个方面。

(1) 地球化学分析表明,2个带中榴辉岩的原岩相同,都具有与现代大洋地壳相似的N-MORB、E-MORB和OIB特征,代表俯冲大洋地壳的成分。

(2) 锆石离子特征定年显示2个变质带榴辉岩的形成时代相同。

(3) 前寒武纪基底的同位素年代学研究^[24,25,34,36]表明,北祁连山缝合带是2个大陆板块的主要边界,该边界分隔了北部以早前寒武纪基底为主的阿拉善-敦煌地块和南部以晚前寒武纪基底为主的祁连-柴达木地块。古生物资料证明,北祁连山两侧中祁连地块与北部的阿拉善地块在寒武纪时古生物分区存在明显不同^[47]。然而,柴北缘超高压变质带两侧的前寒武纪基底并不存在重要差别,暗示柴达木地块和祁连地块属于一个克拉通,其基底年龄和沉积盖层特征反映与扬子克拉通有亲缘性,可能是Rodinia超大陆裂解的碎块,而柴北缘超高压变质带现在所处的位置并不代表2个大陆的汇聚边界。片麻岩锆石残核年龄反映超高压岩石是祁连-柴达木克拉通基底岩石向北俯冲到华北克拉通之下变质的产物。

(4) 在北祁连山,泥盆系是典型的磨拉石建造,反映强烈碰撞造山,略晚于柴北缘超高压变质年龄,与超高压岩石折返的时代相吻合。但是在柴北缘地区泥盆纪地层主要为陆相砂板岩夹海相石灰岩^[22],属于稳定的盖层沉积,这与超高压变质带的产出相矛盾。

5 构造意义

2个变质带榴辉岩的锆石SHRIMP年龄表明古祁连山大约从480 Ma(中奥陶世)开始俯冲。结合蓝片岩冷却年龄和广泛发育的志留纪残余海盆相复理石建造,作者推断本区大洋的消亡和闭合时间为晚奥陶世末(440 Ma)。大洋岩石圈消亡之后,大陆岩石圈受下沉的大洋岩石圈拖曳大约在440 Ma开始向北俯冲碰撞,在423 Ma俯冲深度为100 km,部分达到200 km,并发生超高压变质,至420~400 Ma(泥盆纪)由于大洋与大陆岩石圈脱离(Breakoff)发生折返。这些年龄数据与华北克拉通发生抬升和沉积间断的时间相同。

本区超高压变质年龄与挪威West Gneiss Region超高压变质地体^[48]和欧洲中部一些超高压地体^[49]的年龄一致,可能

与早古生代末Pangea超大陆的形成有密切关系。

谨以此文献给中国地质工作的先驱、板块构造的倡导者、地学大师李春昱先生,纪念他为中国地质事业做出的杰出贡献。

致谢:在SHRIMP定年工作得到了简平、万渝生、张玉海和陶华的帮助,在阴极发光的工作中得到北京大学电子学系梁学磊博士的帮助,在此深表感谢。

参考文献:

- [1]Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps: a first record and some consequences[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1984, 86:107~118.
- [2]Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics[J]. Nature, 1984, 310:641~644.
- [3]Sobolev N V, Shatsky V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks[J]. Nature, 1990, 343:742~746.
- [4]Xu S, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. Science, 1992, 256:80~82.
- [5]Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200km[J]. Nature, 2000, 407:734~736.
- [6]Song S G, Zhang L F, Niu Y L. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh - pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China[J]. American Mineralogist, 2004, 89:1330~1336.
- [7]Rubbato D, Hermann J. Exhumation as fast as subduction? [J]. Geology, 2001, 29:3~6.
- [8]Ernst W G. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices—implications for arcs and continental growth [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 127:253~275.
- [9]Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation[J]. International Geology Review, 1996, 38:485~594.
- [10]李春昱,刘仰文,朱宝清,等.秦岭及祁连山构造发展史[A].见:国际交流地质学术论文集(1)[C].1978.174~187.
- [11]李春昱.中国板块构造轮廓[J].中国地质科学院院报,1980,2(1):11~22.
- [12]杨建军,朱红,邓晋福,等.柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义[J].岩石矿物学杂志,1994,13(2):97~104.
- [13]杨经绥,许志琴,李海兵,等.我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J].科学通报,1998,43:1544~1548.
- [14]杨经绥,许志琴,宋述光,等.青海都兰榴辉岩的发现:试论我国中央造山带中的高压-超高压变质带的分布及构造意义[J].地质学报,2000,74(2):156~168.
- [15]杨经绥,宋述光,许志琴,等.柴北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英[J].地质学报,2001,75(2):175~179.
- [16]宋述光,杨经绥.柴北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体:超高压变质作用的证据[J].地质学报,2001,75(2):180~185.
- [17]Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic Evolution of the Coesite-bearing Ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21:631~644.
- [18]Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, Geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China[J]. Lithos, 2003, 70:195~211.
- [19]Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan Plateau and a paired subduction model[J]. Terra Nova, 2002, 14:397~404.
- [20]Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, Northwestern China[J]. Lithos, 2001, 56:187~206.
- [21]李惠民,陆松年,郑健康,等.阿尔金山东端花岗岩片麻岩中 3.6Ga 锆石的地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20:259~262.
- [22]青海省地质矿产局.青海省区域地质志[J].地质出版社,1991.
- [23]Song S G. Metamorphic Geology of Blueschists, Eclogites and Ophiolites in the North Qilian Mountains [A]. In: 30th IGC Field Trip Guide T392 [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.40.
- [24]Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, et al. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and its adjacent areas[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75: 375~384.
- [25]张建新,孟繁聪,万渝生,等.柴达木盆地南缘金水口群的早古生代构造热事件: 锆石U-Pb SHRIMP年龄证据 [J]. 地质通报, 2003,22:397~404.
- [26]Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1993, 11:523~536.
- [27]宋述光.北祁连山俯冲杂岩带的构造演化[J].地球科学进展,1997,12(4):351~365.
- [28]吴汉泉,冯益民,霍有光,等.北祁连山中段甘肃南奥陶系变质硬柱石蓝片岩的发现及其意义[J].地质论评,1990,(3):277~280.
- [29]Krogh-Ravna E, Terry M P. Geothermobarometry of phengite-Kyanite-quartz/coesite eclogites[A]. In: Eleventh Annual V. M. Goldschmidt Conference, Abstract #3145[C]. LPI Contribution No. 1088, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-Rom), 2001.
- [30]Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1973,19:290~300.
- [31]Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chemical Geology, 56:207~218.
- [32]宋述光,张立飞,李海兵,等.北祁连山高压变质带榴辉岩的锆石SHRIMP定年及其构造意义[J].科学通报,2004,49(6):592~595.
- [33]Song S G, Zhang L F, Chen J, et al. Sodic amphibole exsolutions in garnet from garnet-peridotite, North Qaidam UHP belt, NW China: implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in upper mantle[J]. American Mineralogist, in revision.
- [34]Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Geochemical and Geochronological constraints on tectonic evolution of two types of subduction belts in the Northern Tibetan Plateau[J]. J.Petrol,

in review.

- [35] Song S G, Zhang L F, Su L, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet-peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: A record of complex histories associated with continental collision [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, in review.
- [36] 陆松年. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京:地质出版社, 2002.1~125.
- [37] Mueller S, Phillips R. On the initiation of subduction [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96:651~665.
- [38] Bercovici D. The generation of plate tectonics from mantle convection [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205: 107~121.
- [39] Niu Y, O'hara M J, Pearce J A. Initiation of subduction zones as a consequence of lateral compositional buoyancy contrast within the lithosphere: a petrological perspective [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44: 851~866.
- [40] 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山蛇绿岩的地质构造意义[J]. *地质学报*, 1978, 52:287~295.
- [41] 肖序常, 汤耀庆, 高延林. 再论青藏高原的板块构造[J]. *中国地质科学院院报*, 1986, (4):7~20.
- [42] Liou J G, Wang X M, Coleman R G. Blueschists in major suture zones of China[J]. *Tectonics*, 1989, 8(3):609~619.
- [43] 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 1997, 16(2):112~119.
- [44] Ayers J C, Dunkle S, Gao S, et al. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphic belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite [J]. *Chemical Geology*, 2002, 186:315~331.
- [45] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U-Pb ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161:215~230.
- [46] Jahn B M. Sm-Nd isotope tracer of UHP metamorphic rocks: implications for continental subduction and collisional tectonics[J]. *International Geology Review*, 1999, 41:859~885.
- [47] 崔智林, 梅志超. 祁连山中寒武世牙形石动物群、古生态和板块构造[J]. *古生物学报*, 1997, 36:86~92.
- [48] Krogh E J, Carswell D A. HP and UHP eclogites and garnet peridotites in the Scandinavian Caledonides[A]. In: Coleman R G, Wang X (eds). *Ultrahigh pressure metamorphism*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.244~298.
- [49] Massonne H J, O'Brien P J. The Bohemian Massif and the NW Himalayas[A]. In: Carswell D A, Compagnoni R (eds). *Ultrahigh Pressure Metamorphism*, EMU Notes in Mineralogy, 5 European Mineralogical Union[C]. Budapest: Eötvös University Press, 2003.145~187.

Early Paleozoic plate-tectonic evolution and deep continental subduction on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

SONG Shuguang¹, ZHANG Lifei¹, Y Niu², SONG Biao³, LIU Dunyi³

(1. *School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *Department of Geoscience, University of Houston, Houston, Texas, U.S.;*

3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)*

Abstract: Two different types of high-pressure(HP)-ultrahigh-pressure(UHP)metamorphic belts are developed in the North Qilian Mountains and on the north Qaidam on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. The North Qilian Mountains are a typical circum-Pacific type subduction zone and zircons from eclogite give a SHRIMP U-Pb age of 464 ± 5 Ma; whereas the north Qaidam is a typical continental subduction type metamorphic belt and coesite in zircon from gneiss demonstrates that the northern margin of the Qaidam basin is an UHP metamorphic belt. Super-silicic garnet and ilmenite exsolution in olivine in garnet peridotite reflect that it formed at >200 km depth. The protolith of eclogite in the north Qaidam shows the features of MORB and OIB and has the same age as eclogite of the North Qilian Mountain, representing the age of metamorphism due to subduction of the Early Paleozoic Qilian Ocean. The zircon age of coesite-bearing gneiss and the age of UHP metamorphism of garnet peridotite are both 423 Ma, representing the timing of continental deep subduction. The authors think that the North Qilian Mountain and the north Qaidam are very likely to be the product in different stages from oceanic subduction to continental collision of a subduction zone.

Key words: HP-UHP metamorphic belts; eclogite; garnet peridotite; coesite-bearing gneiss; North Qilian Mountains; north Qaidam